



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 43 22 694 A 1**

⑤1 Int. Cl. 5:
G 02 B 26/10
G 02 B 21/00
G 05 D 19/00

②1 Aktenzeichen: P 43 22 694.9
②2 Anmeldetag: 7. 7. 93
④3 Offenlegungstag: 13. 1. 94

$\hat{=}$ 43 5225923

DE 43 22 694 A 1

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1
09.07.92 US 911192

$\hat{=}$ 43 5225923

⑦1 Anmelder:
General Scanning Inc., Watertown, Mass., US

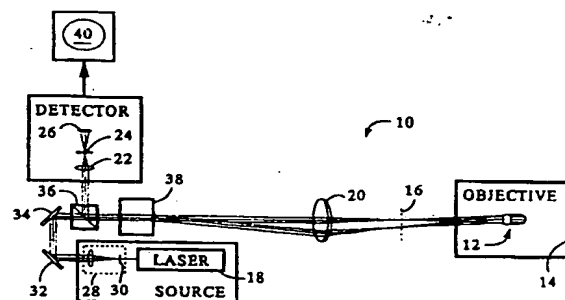
⑦4 Vertreter:
Endlich, F., Dipl.-Phys., 82110 Germering; Lieck, H.,
Dipl.-Ing.; Rupprecht, K., Dipl.-Ing., Pat.-Anwälte,
80538 München; Endlich, K., Dr., Rechtsanw., 8000
München

⑦2 Erfinder:
Montagu, Jean I., Brookline, Mass., US

⑤4 Optisches Instrument mit einer Scannereinrichtung

⑤7 Es wird ein konfokales Mikroskop (10) beschrieben, das eine Scanneranordnung (38) enthält, in der die Ablenkanordnung entlang der x-Achse zwei Resonanz-Scanner (50 und 52) enthält, die um parallele Achsen bei unterschiedlichen Frequenzen oszillieren, von denen eine eine Harmonische der anderen ist.

Als Folge davon kann die Abtastung entlang der x-Achse nahezu linear durchgeführt werden, obwohl sie in Verbindung mit einer Resonanz auftritt, und deshalb Vorteile entsprechend der Schnelligkeit von Resonanzsystemen erzielt werden können. Ein Galvanometer (64) dreht das Gehäuse eines der Resonanz-Scanner (50) um dessen Achse, um eine x-Achse-Schwenkfunktion zu erzielen.



DE 43 22 694 A 1

AB

Die Erfindung betrifft ein optisches Instrument mit einer Scannereinrichtung, insbesondere ein Mikroskop mit einem Mechanismus, um die Position des Zielpunkts zu ändern.

Fig. 1 zeigt ein spezielles Scannermikroskop und dient zur Erläuterung der Arbeitsweise eines derartigen konfokalen Mikroskops. Ein Objektiv 12 ist typischerweise (obwohl nicht notwendigerweise) vorgesehen, das bei konventionellen Mikroskopen benutzt wird und eine Objekzebene 14 in einer Bildebene 16 in üblicher Weise abbildet. Bei einem konventionellen Mikroskop wird der gesamte beobachtete Teil der Bildebene 14 kontinuierlich beleuchtet und die Objektvoptik muß gleichzeitig alle Teile der beobachteten Objekzebene 14 fokussieren. Das konventionelle Mikroskop kann als Instrument angesehen werden, das alle Bildelemente (Pixel) parallel verarbeitet. Dadurch werden viele Kompromisse erforderlich, die zu optischem Geräusch, Verzerrung und begrenztem Auflösungsvermögen führen. Ferner muß das Licht von der beleuchtenden Lichtquelle auf alle Bereiche der Objekzebene aufgeteilt werden, so daß ein einzelner kleiner Teil des beobachteten Objekts nur einen kleinen Bruchteil des von der Lichtquelle emittierten Lichts empfängt.

Scannermikroskope, insbesondere konfokale Mikroskope verringern entsprechende Schwierigkeiten bei konventionellen Mikroskopen. Als Lichtquelle findet typischerweise ein Laser 18 Verwendung, der Licht entlang einem Strahlengang mit einer Abtastlinse 20 überträgt, welche nahezu das gesamte Laserlicht auf einem kleinen Punkt in der Bildebene fokussiert, die ihrerseits konjugiert zu einem entsprechend kleinen Zielpunkt in der Objekzebene 14 ist. Deshalb beleuchtet der Laser nur einen kleinen Zielpunkt in der Objekzebene 14 zu irgendeinem Zeitpunkt. Nahezu das gesamte Laserlicht wird deshalb einem einzigen Zielpunkt zugeführt, der wegen der Abtastlinse 20 und einer anderen Detektorlinse 22 und gewissen noch zu beschreibenden Elementen auch zu einer Eintrittsapertur 24 eines Photodetektors 26 konjugiert ist.

Das Laserlicht von dem Laser 18 verläuft durch einen Strahlenexpander 28 mit einer internen Brennebene 30, die wie die Eintrittsapertur des Detektors auch zu dem einzigen Punkt in der Bildebene konjugiert ist, und das derart expandierte Laserbündel wird bei dem dargestellten Beispiel durch zwei Spiegel 32 und 34 auf einen dichroitischen Spiegel 36 gerichtet, welcher das Laserlicht durch eine Scannereinrichtung 38 leitet, die unten beschrieben werden soll. Die Scannereinrichtung 38 leitet das Licht durch die Abtastlinse 20 und das Objektiv 12. Das reflektierte Licht gelangt zurück durch das Objektiv 12, die Abtastlinse 20 und die Scannereinrichtung, weshalb die eintretenden und reflektierten Lichtwege ein gemeinsames Wegsegment aufweisen. Die beiden Wege verzweigen sich in dem dichroitischen Spiegel 36, wodurch das reflektierte Licht durch die Detektorlinse 22 zu dem Detektor 26 reflektiert wird.

Der Zweck des Scanners 38 besteht darin, sowohl das ankommende Licht vom Laser 18 als auch das reflektierte Licht von der Objekzebene 14 abzulenken und dabei den Punkt in der Bildebene 16 zu bewegen und damit in der Objekzebene 14, zu der sowohl der Strahlenexpander-Brennpunkt 30 und die Detektorapertur 24 konjugiert sind. Der Scanner bewegt typischerweise diesen Punkt rasterförmig und eine Rasterabtastungs-Displayeinrichtung 40, die synchron mit dem Scanner 38

betätigt wird, zeigt das resultierende Detektorausgangssignal an.

Die Verwendung einer derartigen Anordnung ergibt eine Reihe von Vorteilen hinsichtlich der Arbeitsweise. Beispielsweise kann die Detektorapertur 24 als Okularöffnung wirken, wodurch sich eine räumliche Filterwirkung ergibt, um das Auflösungsvermögen zu verbessern, wie es bei einer entsprechenden Apertur in der Brennebene 30 des Strahlenexpanders der Fall ist. Da nur ein sehr kleiner Teil der Objekzebene zu irgendeinem Zeitpunkt beleuchtet wird, ist sehr wenig Licht von anderen Stellen der Objekzebene für eine Abbildung auf die Detektorokularöffnung (wegen Verzerrungen des optischen Systems) und wirkt deshalb als Störung. Ein weiterer Vorteil ist der resultierende beträchtliche Lichtwirkungsgrad. Die zur Beleuchtung eines Objekts in einem Scannermikroskop benötigte Lichtleistung ist ein sehr kleiner Bruchteil derjenigen, die zur Erzielung des gleichen Niveaus der Beleuchtung bei einem konventionellen Mikroskop benötigt wird. Da eine derartige Beleuchtung es ermöglicht, eine hohe augenblickliche Lichtintensität in dem Zielpunkt zu ermöglichen, können gewisse wünschenswerte Abbildungsverfahren, beispielsweise unter Verwendung von Fluoreszenz, praktischer als im Vergleich zu sonstigen Verfahren sein.

Durch Verwendung von Objektiven mit hoher numerischer Apertur sind konfokale Mikroskope besonders gut dazu geeignet, dreidimensionale Abbildungen von halbdurchlässigen Objekten wie von biologischen Proben durchzuführen. Das Mikroskop nimmt eine Serie von zweidimensionalen "Scheiben", von denen jede bei unterschiedlicher Tiefe in der Probe gebildet wird. Die derart erhaltenen Scheiben können sequentiell beobachtet oder durch einen Computer verarbeitet werden, um Scheiben entlang der Probe mit unterschiedlichen Winkeln zu erhalten. Durch Verwendung entsprechender Techniken können auch Abbildungen von nicht ebenen lichtundurchlässigen Objekten erhalten werden.

Gewisse Schwierigkeiten ergeben sich jedoch wegen des Scannermechanismus. Fig. 2 zeigt einen typischen Scannermechanismus. Er enthält einen ersten Ablenkmechanismus in der Form eines galvanometrisch angetriebenen Spiegels 42, welcher derart verschwenkt wird, daß der Zielpunkt sich in Richtung parallel zu einer Achse bewegt, die als die x-Achse bezeichnet werden kann. Dabei lenkt der Spiegel 42 das Laserbündel auf einen in gleicher Weise angetriebenen zweiten Spiegel 44, welcher eine Bewegung des Zielpunkts in Richtungen parallel zu einer orthogonalen y-Achse verursacht. Bei dem dargestellten Scannermechanismus wird der Spiegel 44 um eine Achse verschwenkt, die durch dessen Zentrum verläuft, während der Spiegel 42 paddelförmig um eine Achse 46 verschwenkt wird, die in einem Abstand von der Spiegeloberfläche verläuft. Das Ergebnis dieser Anordnung besteht darin, daß trotz der Änderung des Winkels, unter dem Licht von der Laserquelle von dem Spiegel 42 reflektiert wird, die Stelle sich nicht beträchtlich ändert, an der das zurückkommende Bündel auf den Spiegel 44 auftrifft. Deshalb kann der Spiegel 44, der vielfach so schnell wie der Spiegel 42 verschwenkt werden muß, verhältnismäßig klein ausgebildet sein.

Trotz dieser geringen Größe ist es schwierig, die erforderliche Geschwindigkeit zu erzielen, um die sehr strengen Anforderungen erfüllen zu können, denen konfokale Mikroskope unterworfen sein können. Wegen der erwähnten mehrfachen Abtastung kann die Aquisi-

tionszeit für eine vollständige Abbildung nachteilig lang sein, falls jede Rasterabtastung nicht extrem schnell erfolgt. Ferner sind konfokale Mikroskope verhältnismäßig teuer, so daß es wünschenswert ist, diese Tendenz in einem gewissen Ausmaß abzuschwächen, indem so wenig spezialisierte Teile wie möglich benutzt werden. Es ist deshalb vorteilhaft, die mechanische Abtastung kompatibel mit Abstraten beim Fernsehen zu machen, welche ziemlich hoch sind. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn eine Kompatibilität mit Fernseheinrichtungen mit hoher Bildschärfe wünschenswert ist.

Diese Schwierigkeiten gelten nicht nur für konfokale Mikroskope, welche eine Abtastung in dem Strahlengang sowohl von der Lichtquelle und zu dem Detektor ermöglichen, sondern treten auch bei anderen Arten von Scannermikroskopen auf, welche eine Abtastung in nur einem der Strahlengänge ermöglichen.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß ein großer Teil der Schwierigkeiten bei der Herstellung von konfokalen oder anderen Scannermikroskopen aus konventionellen Komponenten darauf zurückzuführen ist, daß nicht in Resonanz befindliche Scanner benutzt werden müssen. Ein derartiger Scanner wird so angetrieben, daß die Scannerbewegung dem Antriebssignal mehr oder weniger getreu folgt. Die mit derartigen Scannern erzielbare Abtastfrequenz bei gegebenen Kosten und vorgegebenem Leistungsniveau ist viel niedriger als diejenige, die mit Resonanzscannern erzielt werden kann, welche in der Nähe ihrer mechanischen Resonanzen arbeiten und deshalb ihren Antriebssignalen nicht genau folgen. Das Erfordernis der Verwendung von nicht in Resonanz befindlichen Scannern ergibt sich darauf, daß ein abtastendes Mikroskop oft benötigt wird, um eine Schwenkfunktion zu ermöglichen, was mit Hilfe von Resonanzscannern nicht ohne weiteres erzielt werden kann. Falls der Zielpunkt nicht die Art Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit durchführt, was am einfachsten mit nicht in Resonanz befindlichen Scannern erreicht werden kann, muß die Lichtquelle speziell entsprechend der Abtastung moduliert werden, damit die Beleuchtung die benötigte Gleichförmigkeit ergibt, z. B. bei Lumineszenz-Anwendungsfällen.

Bei der Erfindung wird eine Anordnung vorgesehen, bei der die Verwendung von Resonanzscannern bei derartigen Anwendungszwecken geeignet ist. Gemäß einem Merkmal der Erfindung benutzt ein konfokales Mikroskop ein Scannersystem, bei dem die Ablenkeinrichtung für eine Achse eine Mehrzahl von Resonanzfrequenzen aufweist, von denen eine die fundamentale Abtastfrequenz ist und mindestens eine andere eine Harmonische dieser Frequenz ist. Die resultierende Ablenkung kann nahezu linear erfolgen, obwohl die Ablenkeinrichtung in Resonanz befindlich angetrieben wird. Deshalb kann eine schnelle Resonanzabtastung in einem konfokalen Mikroskop durchgeführt werden.

Gemäß einem anderen Merkmal der Erfindung kann ein konfokales oder anderes Scannermikroskop in Resonanz befindlich abtasten, obwohl eine Schwenkfunktion vorgesehen werden muß. Entsprechend diesem Merkmal der Erfindung werden sowohl vielfach in Resonanz befindliche und nicht in Resonanz befindliche Antriebe benutzt, um eine Ablenkung entlang derselben Achse zu bewirken. Das Gehäuse des Resonanzscanners kann beispielsweise durch ein Galvanometer oder eine andere Antriebseinrichtung gedreht werden, um eine Schwenkung in Richtung der Resonanzabtastung zu erzielen. Wahlweise kann ein zweiter nicht in Resonanz befindlicher Spiegel angetrieben werden, um eine

Ablenkung entlang derselben Achse zu erzielen, wiederum um die ohne Resonanz erzeugte Bewegung auf die mit Resonanz erzeugte Bewegung zu überlagern.

Eine Überlagerung harmonischer Resonanzbewegungen wurde bereits für andere Verwendungszwecke vorgeschlagen, wobei allerdings gewisse Schwierigkeiten auftraten. Diese Schwierigkeiten sind darauf zurückzuführen, daß genaue Phasen- und Amplitudenbeziehungen zwischen den verschiedenen harmonischen Komponenten beibehalten werden müssen. Während eine Modulation der Resonanzscanner-Amplitude bei den (relativ geringen) benötigten Raten nicht schwierig ist, verursachen konventionelle Wege zur Beibehaltung der gewünschten Phasenbeziehung Schwierigkeiten. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, daß die Phasenbeziehung zwischen dem Antriebssignal und der Resonanzbewegung extrem empfindlich für den Unterschied zwischen der Frequenz des Treibersignals und der Eigenfrequenz des Scanners ist, der typischerweise einen hohen Q-Faktor hat. Eine abrupte Änderung von nahezu 180° bei der Phasendifferenz zwischen dem Antriebssignal und der Scannerbewegung tritt auf, wenn die Eigenfrequenz zwischen Werten driftet, die nur etwas über und unter der Antriebsfrequenz liegen, beispielsweise wegen Alterung oder wegen Umweltfaktoren wie der Temperatur.

Entsprechend einem weiteren Merkmal der Erfindung kann jedoch einer der Scanner für eine gegebene Achse der Bewegung abstimbar sein, und die Phasenbeziehung zwischen den beiden harmonisch bezogenen Resonanzen wird beibehalten, aber nicht durch Einjustierung des Treibersignals, sondern durch Einjustierung der abstimmbaren Resonanzfrequenz des Scanners. Es hat sich gezeigt, daß damit eine wesentlich stabilere Steuerung der Phasenbeziehung zwischen sinusförmigen Bewegungskomponenten erzielt werden kann, wodurch es praktischer ist, Resonanzscanner für lineare Abtastvorgänge zu verwenden.

Anhand der Zeichnung soll die Erfindung beispielsweise näher erläutert werden. Es zeigen:

Fig. 1 ein Blockdiagramm eines konfokalen Scannermikroskops der erwähnten Art, auf das die Erfindung gerichtet ist,

Fig. 2 eine isometrische Ansicht einer bekannten Scannereinrichtung der erwähnten Art für ein konfokales Mikroskop,

Fig. 3 eine vereinfachte isometrische Ansicht eines Scanners, der bei einem Ausführungsbeispiel der Erfindung benutzt wird,

Fig. 4A und 4B eine Untersetzerkomponente für den Scanner in Fig. 3,

Fig. 5 eine Schnittansicht, bei der Teile weggebrochen sind, betreffend den reaktionsfreien Scanner der Einrichtung in Fig. 3,

Fig. 6 eine vereinfachte isometrische Ansicht der Scannereinrichtung gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Fig. 7 ein Blockdiagramm des Steuersystems zur Beibehaltung der richtigen Phasenbeziehung zwischen den beiden harmonisch bezogenen Orten der Scannereinrichtung entweder in Fig. 3 oder Fig. 6; und

Fig. 8 ein abgewandeltes Ausführungsbeispiel des Steuersystems.

Bei einem Ausführungsbeispiel gemäß der Erfindung liefert die Scannereinrichtung 38 des konfokalen Mikroskops 10 in Fig. 1 in Resonanz befindlich eine im wesentlichen lineare Abtastung in x-Richtung unter Benutzung einer x-Achse-Ablenkeinrichtung mit zwei Scan-

nen 50 und 52 (Fig. 3), welche bei harmonisch bezogenen Frequenzen oszillieren, wie im folgenden noch näher erläutert werden soll. Beispielsweise kann der Scanner 50 ein 2-kHz Resonanzscanner sein, während der Scanner 62 ein 6-kHz Resonanzscanner sein kann. Diese Frequenzkomponenten sind die Frequenzkomponenten einer 2-kHz Dreieckswelle mit den zwei höchsten Amplituden. Wenn die Phasen und Amplituden dieser beiden Scannerbewegungen geeignet bezogen sind, verursachen sie eine x-Ablenkung, die eine dreieckförmige, also eine im wesentlichen lineare Bewegung des Zielpunkts in Abhängigkeit von der Zeit annähert.

Obwohl bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel nur zwei der Fourier-Komponenten benutzt werden, ist die resultierende Annäherung einer Dreieckswelle verhältnismäßig gut. Die Fourier Expansion einer Dreieckswelle der Periode T und positive und negative Amplituden der Einheit, also eine Amplitude von Scheitelwert zu Scheitelwert von zwei, ist gegeben durch die Gleichung:

$$\Delta(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{n^2} \sin \frac{2\pi n t}{T}$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß das Weglassen der fünften Harmonischen zu einem Fehler aufgrund des Fehlens dieser Harmonischen von $(8/\pi^2)(1/5^2) = 0,0324$ oder weniger als 2% der Amplitude von Scheitelwert zu Scheitelwert der Rechteckswelle führt. Es kann gezeigt werden, daß das Weglassen aller höheren Harmonischen diesen Fehler noch weiter verringert. Deshalb ergibt sich eine gute Annäherung der gewünschten Wellenform aus der Benutzung von nur zwei Harmonischen. Eine derartige Genauigkeit resultiert nicht aus nur zwei Harmonischen bei jeder Wellenform. Speziell erfordert eine sägezahnförmige Wellenform vielmehr Harmonische, um die gleiche Genauigkeit erzielen zu können. Das Prinzip ist jedoch das gleiche: Eine nicht sinusförmige periodische Ablenkungswellenform kann durch Benutzung einer Mehrzahl von Resonanzscannern erzielt werden, deren Resonanzfrequenzen harmonisch bezogen sind.

Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel wird die Bewegung entlang der y-Achse durch einen Galvanometer-Scanner 58 erzeugt, der in einer paddelförmigen Konfiguration angeordnet ist, was bedeutet, daß das Lichtbündel auf den Spiegel 60 an einer Stelle auftrifft, die von der Schwenkachse des Spiegels einen Abstand aufweist. Das Verschwenken des Spiegels 60 ändert nicht nur den Winkel, unter dem das eintretende und das austretende Bündel 62 abgelenkt wird, sondern auch die Stelle auf dem Spiegel 60, an der diese Bündel auftreffen. Die Anordnung wird derart gewählt, daß die resultierende Bewegung der Punkte, auf denen die Bündel auf die x-Achse-Spiegel 54 und 56 auftreffen, minimal gehalten wird, wobei das Bündel um einen "Drehpunkt" zwischen den Spiegeln 54 und 56 derart gedreht wird, daß die Größe dieser Spiegel minimal gehalten werden kann, was für hochfrequente Resonanzscanner wünschenswert ist. Wie in der US-PS 5 048 904 für einen Scanner mit zwei Spiegeln mit einer Pincushion-Fehlerkorrektur beschrieben wird, ergibt diese Aufstellung der Resonanzscanner 50 und 52 zwischen dem Galvanometer-Scanner 58 und dem (typischerweise das Feld flachenden) Objektiv 12 (Fig. 1) eine Anordnung, bei der

eine Korrektur der sogenannten Kissenverzeichnung der Rasterform durchführbar ist, die sonst auftreten würde.

Durch die Verwendung von harmonisch bezogenen Resonanzen ist es möglich, die hohen Abtastraten zu erzielen, die für konventionelle Displays und solche mit hohem Auflösungsvermögen erforderlich sind, wobei gleichzeitig ein lineares Abtasten erzielt wird, was besonders wichtig für Fluoreszenz-Mikroskope ist.

Wie bereits erwähnt wurde, ist es jedoch bei vielen konfokalen Mikroskopen ebenfalls wünschenswert, eine Zoom- und Schwenkfunktion vorzusehen. Eine Zoomfunktion kann ohne weiteres durch einfache Einstellung der Amplitude der Scannerbewegung erzielt werden. Eine Schwenkfunktion, also eine Änderung der Lage des Zentrums des Bilds kann ohne weiteres in Richtung der y-Achse durch eine geeignete Steuerung des Galvanometer-Scanners 58 erzielt werden. Eine Schwenkfunktion in x-Richtung kann jedoch nicht ohne weiteres erzielt werden, weil die Scanner 50 und 52 Resonanzscanner sind und deshalb nicht ohne weiteres die Addition einer "Gleichstromkomponente" zu ihrer Bewegung ermöglichen.

Bei der Erfindung wird ein weiterer Scanner 64 in der Ablenkeinrichtung der x-Achse vorgesehen. Dieser Scanner ist ein Galvanometer-Scanner, der dazu benutzt wird, eine "Gleichstrom"-Schwenkbewegung auf die Resonanzbewegung zu überlagern, welche die Scanner 50 und 52 liefern. Der Scanner 50 wird drehbar angeordnet, so daß der Galvanometer-Scanner 64 diesen mit Hilfe eines Bewegungsuntersetzers 66 drehen kann, wodurch das Scheinträgheitsmoment des Scanners 50 verringert werden kann, das von dem Scanner 64 gesehen wird.

Der Bewegungsuntersetzer enthält ein elastisches Band 68 (Fig. 4A und 4B). Wie aus der Zeichnung ersichtlich ist, weist das Band einen Schlitz 70 und einen komplementären Halsbereich 72 auf. Eine Zunge 74 wird durch den Schlitz 70 eingesetzt, um eine Schleife 76 zu bilden, wie aus Fig. 4B ersichtlich ist. Die Welle 78 des Galvanometer-Scanners 64 wird durch die Schleife 76 eingesetzt. Das Band 68 wird an der Welle 78 beispielsweise durch Befestigung in einer Öffnung 80 gesichert. Die Enden des Bands 68 werden dann entlang der Oberfläche einer bogenförmigen Rippe 82 auf dem Gehäuse des Resonanz-Scanners 50 angelegt und daran mit den Enden befestigt. Wegen der Elastizität des Streifens 68 verursacht die Kopplung nur ein vernachlässigbares Spiel.

Bei dem Ausführungsbeispiel in Fig. 3 ist vorzugsweise der Resonanzscanner 50 mit dem das Galvanometer 64 gekoppelt ist, "reaktionsfrei" ausgeführt, wie es beispielsweise bei den in der US-PS 4 919 500 beschriebenen Scannern der Fall ist. Wie an sich bekannt ist, wird die Resonanzbewegung eines Resonanzscanners weitgehend durch den Austausch von Energie zwischen der Bewegung einer Masse, primär des Spiegels, und der Ablenkung eines elastischen Glieds verursacht, an dem die Masse befestigt ist. Bei konventionellen Resonanzscannern ist das elastische Glied irgendwie an dem Scannergehäuse befestigt. Deshalb ergibt sich eine Struktur wie diejenige des Galvanometer-Scanners 64 in Fig. 3, an der das Gehäuse des Resonanzscanners befestigt ist, welche nicht nur das Drehmoment aufnehmen muß, das von der Motorkraft herrührt, sondern auch das viel größere Drehmoment, das von der Kraft des elastischen Glieds gegen das Gehäuse herrührt.

Im Gegensatz dazu zeigt Fig. 5 einen reaktionsfreien

Resonanzscanner. Die Welle 84, an der der Spiegel 54 angeordnet ist, wird praktisch nur durch Gehäusestücke 86 und 88 abgestützt, welche diese in der Position eines vergrößerten Stützbereichs 90 abstützen. Der Spiegel wird durch einen Motor mit Wicklungen 92 angetrieben, die an dem Gehäuse angeordnet sind, und mit Hilfe eines magnetischen Polstücks 94 an der Welle 84. Die Welle 84 besteht aus elastischem Material und die Beziehung deren Torsions-Federkonstanten zu dem Trägheitsmoment des Spiegels 54 wird derart ausgewählt, daß sich eine Spiegelbewegung mit etwa 180° Phasenverschiebung im Vergleich zu dem Polstück (Rotor) 94 ergibt, wenn der Scanner mit der Resonanzfrequenz angetrieben wird. Dies bedeutet, daß die Torsionsdeformation der Welle 84 von der entgegengesetzten Bewegung deren gegenüberliegenden Enden herrührt. Die Welle wird so angeordnet, daß der vergrößerte Bereich 90, an dem eine Abstützung an dem Gehäuse erfolgt, ein Knotenpunkt dieser Resonanzbewegung ist. Die Amplitude der Drillbewegung der Welle ist an dieser Stelle praktisch gleich Null, steigt aber (in entgegengesetzten Richtungen) mit dem Abstand von dieser Stelle zu Maximalwerten an den gegenüberliegenden Enden der Welle an. In dieser Weise werden die hohen Drehmomente bei der Resonanzbewegung nicht auf das Gehäuse übertragen, wodurch das Drehmoment wesentlich verringert wird, das von dem Galvanometer-Scanner 64 verlangt wird.

Um die genannten Schwierigkeiten zu vermeiden, die sich aus der mechanischen Kopplung zwischen Galvanometer-Scanner 64 und Resonanz-Scanner 50 ergeben, kann eine Anordnung der in Fig. 6 dargestellten Art vorgesehen werden, wobei gleiche Komponenten mit den gleichen Bezugszeichen versehen sind. Bei der Anordnung in Fig. 6 wird eine Schwenkfunktion nicht durch Drehen des Gehäuses des Resonanz-Scanners 50, sondern durch Ablenken des Bündels mit einem Galvanometer-Scanner 98 erzeugt, dessen Spiegel 100 in dem Strahlengang angeordnet ist. Deshalb enthält die Ablenkeinrichtung entlang der x-Achse anstelle von nur zwei drei Spiegel 54, 56 und 100.

Obwohl in der Zeichnung nur zwei Resonanz-Scanner dargestellt sind, von denen der eine eine Resonanz bei der dritten Harmonischen der Frequenz hat, bei der der andere eine Resonanz hat, können weitere Scanner vorgesehen werden, um andere Harmonische hinzuzufügen, wodurch die Genauigkeit erhöht werden kann, mit der die dreieckförmige Wellenform angenähert wird oder womit andere Wellenformen erzeugt werden können. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel wird nur eine ungeradzahlige Harmonische verwandt, weil die Fourier-Reihe für eine symmetrische dreieckförmige Welle nur ungeradzahlige Harmonische hat, aber andere harmonische Kombinationen entsprechend der Fourier-Transformation für andere periodische Wellenformen benötigt werden.

Obwohl es vorgezogen wird, individuelle Scanner mit einer einzigen Resonanzfrequenz für diesen Zweck zu verwenden, können die getrennten Scanner mit einer einzigen Resonanzfrequenz durch einen einzigen Scanner mit mehreren Resonanzfrequenzen ersetzt werden. Beispielsweise ist in der US-PS 4 859 846 die Arbeitsweise eines derartigen Scanners beschrieben, welcher Scanner benutzt werden könnte, eventuell mit dem dort benutzten Steuersystem, um die Lehre der vorliegenden Erfindung zu realisieren.

Vorzugsweise wird jedoch ein in Fig. 7 dargestelltes Steuersystem benutzt. Wie bereits erläutert wurde, be-

steht eine der bisherigen Schwierigkeiten bei der Steuerung von Umlenkeinrichtungen mit harmonisch in Beziehung stehenden Resonanzen darin, daß die relativen Phasen der Komponenten der Resonanzbewegung schwierig zu steuern sind, weil die Phasenbeziehung zwischen dem Antriebssignal und der Bewegung eines Scanners mit hohem Q-Faktor in der Nähe der Resonanz drastische Änderungen als Folge von kleinen Änderungen von Faktoren wie Alterung, Abnutzung oder Umgebungstemperatur erfahren kann. Diese Schwierigkeit wird bei dem Steuersystem in Fig. 7 dadurch vermieden, daß die Phase nicht durch direkte Steuerung der Antriebssignalphase, sondern durch Abstimmung eines abstimmbaren Scanners gesteuert wird, vorzugsweise in analoger Weise wie bei konventionellen bei einer PLL-Phasenregelschleife.

In konventioneller Weise bestimmt ein Phasendetektor 104 die Phasendifferenz zwischen den (Positions- oder Geschwindigkeits)-Ausgängen der Scanner 50 und 52. Dies bedeutet, daß der Phasendetektor 104 einen Ausgang proportional der Differenz zwischen den Zeitpunkten des Auftretens eines Nulldurchgangs der fundamentalen Komponente und eines angrenzenden Nulldurchgangs der harmonischen Komponente erzeugt. Der resultierende Phasendifferenz-Ausgang wird zur Steuerung der Phase (und effektiv der Frequenz) des Scanners 52 benutzt. Anstelle der Verwendung zur Erzeugung eines Treibersignals für den Scanner 52 wird jedoch diese Phasendifferenz von einer Heizschaltung 106 benutzt, um die Stromstärke durch ein Heizelement 107 (Fig. 5) zu ändern, das die Scannerwelle 84 umgibt. Die Federkonstante der Welle 84 hängt von deren Temperatur ab und deshalb auch die Resonanzfrequenz des Scanners. Durch Steuerung des Heizstroms in Abhängigkeit von der Phasendifferenz zwischen den beiden Scannern kann man ihre geeignete Phasenbeziehung beibehalten, ohne daß sich Schwierigkeiten ergeben, die von dem Versuch herrühren, eine direkte Steuerung der Treibersignalphase durchzuführen. Das Treibersignal, das dem Scannertreiber 108 in Fig. 7 zugeführt wird, stammt nicht von einem getrennten Signalgenerator, sondern wird durch Mitkopplung von dem Ausgang des Scanners 52 abgeleitet. Wegen der Mitkopplung zeigt die Schleife mit dem Scanner 52 und dessen Treiber 108 eine Instabilität bei geringer Amplitude. Dieses System ist selbstschwingend und die Amplitude steigt kontinuierlich an, bis die internen Verstärker des Treibers 108 Sättigung erreichen. Um eine geeignete vorherbestimmte Amplitude zu erzielen, die durch den Fourier-Koeffizienten C_3 für die dritte Harmonische eingestellt wird, justiert eine Amplituden-Steuerschaltung 110 ein Dämpfungsglied 112, um den gesättigten Verstärker-Ausgang zu dämpfen.

Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel ist der Scanner 50 derart ausgebildet, daß er durch gleichartige Rückkopplung mit seinem Treiber 114 selbstschwingend ist, und eine Amplituden-Steuereinrichtung 116 benutzt ein entsprechendes Dämpfungsglied 118, um die Amplitude beizubehalten, die durch den Fourier-Koeffizienten C_1 für die fundamentale Komponente bestimmt wurde.

Ein äquivalentes System ersetzt das Heizelement 107 mit den Windungen einer magnetischen Feder, welche zwischen der Welle des Scanners und dem Gehäuse angreift. Eine derartige Feder kann wie in der US-PS 4 959 568 beschrieben ausgebildet sein. Derartige Systeme tendieren nicht dazu, einen so breiten Resonanzfrequenzbereich wie abstimmbare Scanner mit einem

Heizelement zu verursachen, aber ihre Resonanzfrequenzen können normalerweise schneller geändert werden.

Obwohl die Anordnung in Fig. 7 vorgezogen wird, kann entsprechend Fig. 8 ein Steuerschema benutzt werden, was die Breite der Anwendbarkeit der Konzeption mit abstimmbarem Scanner demonstriert. Bei dieser Anordnung liefert ein frei laufender Oszillator 122 den Eingang für den Treiber 108 des Scanners 52. Dies bedeutet, daß der Scanner 52 nicht selbstschwingend mit seinem Treiber bei dieser Anordnung ist und daß die Systemresonanz nicht automatisch gesucht wird, obwohl der Oszillator 122 so ausgebildet werden kann, daß der Scanner 52 so nah bei dieser Resonanz wie gewünscht angetrieben werden kann. Der Scannerausgang wird ggf. nach einer gewissen Phaseneinstellung in einem Phasenschreiber 124 einem Frequenzteiler 126 zugeführt, dessen Ausgangsfrequenz ein Drittel seiner Eingangsfrequenz beträgt. Der Frequenzteiler 126 führt seinen Ausgang dem Treiber 114 des Scanners 50 zu.

Deshalb hält das Steuersystem in Fig. 8 eine konstante Phasenbeziehung zwischen dem Ausgang des Scanners 52 und dem Eingang zum Scanner 50 aufrecht. Wie bereits erwähnt wurde, ist jedoch die Beziehung zwischen dem Eingang und dem Ausgang eines Scanners mit hohem Q-Faktor stark veränderlich, wie beispielsweise bei einem in der Nähe der Resonanz arbeitenden Scanner 50, was der Ursprung von Problemen bei bekannten Versuchen war, Systeme mit mehrfacher Resonanz zu verwenden, um gewünschte nicht sinusförmige periodische Signale zu liefern. Ohne zusätzliche Maßnahmen würde deshalb die Phasenbeziehung zwischen den Ausgängen der Scanner 50 und 52 zu Änderungen tendieren, obwohl die Beziehung zwischen dem Ausgang des Scanners 52 und dem Eingang des Scanners 50 festliegt. Das Steuersystem in Fig. 8 hält jedoch die Phasenbeziehungen zwischen den Ausgängen konstant, wodurch die Schwierigkeiten vermieden werden können, mit denen bekannte Anordnungen behaftet sind, bei denen die Resonanzfrequenz des Scanners 50 in Abhängigkeit von der Phasendifferenz zwischen dem Eingang des Scanners und dessen Ausgang (oder in äquivalenter Weise zu der Phasendifferenz zwischen den Ausgängen der Scanner 50 und 52) eingestellt wird.

Bei der Ausführungsform in Fig. 8 findet ein Phasendetektor 128 Verwendung, der ähnlich wie der Phasendetektor 104 ausgebildet ist. Der Phasendetektor 128 spricht auf die Differenz zwischen den Ausgängen der beiden Scanner an, um ein Steuersignal an eine Heiz-Steuereinrichtung 130 zu liefern, ähnlich wie die Steuerung 106 in Fig. 7, welche Steuerung die Resonanzfrequenz des Scanners 50 einstellt. In dieser Weise wird durch die Anordnung in Fig. 8 die geeignete Phasenbeziehung zwischen den beiden harmonischen Komponenten der Bewegung des Zielpunkts beibehalten.

Patentansprüche

1. Optisches Instrument mit
 - A) mindestens einer Lichtquelle und mindestens einem Lichtdetektor,
 - B) einer einen Strahlengang zwischen einem Zielpunkt in einem Objektbereich und der Lichtquelle oder dem Detektor definierenden Einrichtung, und mit
 - C) einer in dem Strahlengang angeordneten Scanneranordnung, welche

i) mindestens eine Ablenkanordnung aufweist, die eine Ablenkachse aufweist und eine Resonanz sowohl bei einer ersten fundamentalen Resonanzfrequenz als auch bei einer zusätzlichen harmonischen Resonanzfrequenz aufweist, die eine Harmonische der fundamentalen Resonanzfrequenz ist, sowie

ii) einen Treibermechanismus zum Ändern der Position des Zielpunkts in Richtungen im wesentlichen parallel zu der zugeordneten Ablenkungsachse, durch gleichzeitigen Antrieb der Ablenkanordnung ohne Resonanz und Antrieb mit Resonanz bei der fundamentalen und der harmonischen Resonanzfrequenz, wobei der Antriebsmechanismus ein Steuersystem zur Aufrechterhaltung einer vorherbestimmten Phasenbeziehung zwischen Komponenten der Bewegung des Zielpunkts bei den beiden Resonanzfrequenzen enthält.

2. Optisches Instrument nach Anspruch 1, wobei die Scanneranordnung

A) einen drehbar angeordneten Resonanz-Scanner aufweist, dessen Spiegel so positioniert ist, daß Licht entlang dem Strahlengang reflektiert wird, und wobei

B) ein Motor zum Drehen des Resonanz-Scanners ohne Resonanz vorgesehen ist.

3. Optisches Instrument nach Anspruch 2, wobei die Ablenkanordnung eine elastische Bewegungs-Reduziereinrichtung enthält, die den Motor mit dem Resonanz-Scanner koppelt.

4. Optisches Instrument nach Anspruch 2 oder 3, wobei der Resonanz-Scanner ein reaktionsfreier Scanner ist.

5. Optisches Instrument nach Anspruch 2, wobei

A) die Ablenkanordnung einen zweiten Resonanz-Scanner getrennt von dem ersten Resonanz-Scanner aufweist, wobei die Resonanzfrequenz des ersten Resonanz-Scanners eine fundamentale oder harmonische Resonanzfrequenz ist, wobei die Resonanzfrequenz des zweiten Resonanz-Scanners die andere fundamentale oder harmonische Resonanzfrequenz ist, und wobei

B) der Antriebsmechanismus getrennte erste und zweite Treiber zum Antrieb des ersten bzw. des zweiten Resonanz-Scanners aufweist, im wesentlichen bei ihren Resonanzfrequenzen, und wobei ein dritter Treiber zum Antrieb des Motors ohne Resonanz vorgesehen ist.

6. Optisches Instrument nach Anspruch 1, wobei

A) die Ablenkanordnung sowohl einen Resonanz-Scanner als auch einen Scanner ohne Resonanz aufweist, deren getrennte Spiegel die Position des Zielpunkts in Richtungen ändern, die im wesentlichen parallel zu der Ablenkachse verlaufen, und wobei

B) der Treibermechanismus die Scanner mit bzw. ohne Resonanz antreibt.

7. Optisches Instrument nach Anspruch 1, wobei eine Mikroskop-Objektivlinse in dem Strahlengang angeordnet und auf den Objektbereich fokussiert ist.

8. Optisches Instrument nach Anspruch 8, wobei

A) das optische Instrument sowohl eine Lichtquelle als auch einen Lichtdetektor enthält,

B) die den Strahlengang definierende Einrichtung einen Lichtquellen- und einen Detektor-

Strahlengang zwischen dem Zielpunkt und der Lichtquelle bzw. dem Detektor definiert, derart daß die beiden Strahlengänge ein gemeinsames Wegsegment aufweisen, und wobei C) die Abtastanordnung und das Objektiv in dem gemeinsamen Wegsegment angeordnet sind.

9. Konfokales Mikroskop mit

- A) einer Lichtquelle,
- B) einem Lichtdetektor,
- C) einer Mikroskop-Objektivlinse zur Beobachtung eines Objektbereichs,
- D) einer den Strahlengang von der Lichtquelle und dem Detektor zwischen einem Objektpunkt in dem Objektbereich und der Lichtquelle bzw. dem Detektor definierenden Einrichtung, derart daß der Strahlengang der Lichtquelle und des Detektors ein gemeinsames Wegsegment aufweisen, sowie mit
- E) einer Scanneranordnung, die in dem gemeinsamen Wegsegment angeordnet ist und i) mindestens eine Ablenkanordnung aufweist, die einer Ablenkachse zugeordnet ist und eine Resonanz sowohl bei einer ersten fundamentalen Resonanzfrequenz auch bei einer zusätzlichen harmonischen Resonanzfrequenz aufweist, die eine Harmonische der fundamentalen Resonanzfrequenz ist, sowie
- ii) einen Treibermechanismus zum Antrieb der Ablenkanordnung aufweist, um die Position des Zielpunkts in Richtungen im wesentlichen parallel zu der zugeordneten Achse bei der fundamentalen und der harmonischen Resonanzfrequenz gleichzeitig zu ändern, wobei der Treibermechanismus ein Steuersystem zur Beibehaltung einer vorherbestimmten Phasenbeziehung zwischen den Komponenten der Bewegung des Zielpunkts bei den beiden Resonanzfrequenzen aufweist.

10. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 9, wobei

- A) die Ablenkanordnung einen ersten Scanner aufweist, dessen Resonanzfrequenz die fundamentale Resonanzfrequenz ist, und einen zweiten Scanner aufweist, dessen Resonanzfrequenz die harmonische Resonanzfrequenz ist, und wobei
- B) der Treibermechanismus einen ersten und einen zweiten Treiber zum Antrieb des ersten bzw. des zweiten Scanners aufweist, im wesentlichen bei deren Resonanzfrequenz.

11. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 10, wobei das Steuersystem

- A) einen Phasenkomparator zum Vergleich der Phasen der Komponenten der Bewegung der Ablenkanordnung bei den beiden Resonanzfrequenzen aufweist, und wobei
- B) eine Resonanzfrequenz-Steuereinrichtung vorgesehen ist, die auf den Phasenkomparator anspricht, um derart eine der Resonanzfrequenzen zu steuern, daß eine vorherbestimmte Phasenbeziehung zwischen den beiden Resonanzfrequenzkomponenten beibehalten wird.

12. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 11, wobei die Resonanzfrequenz-Steuereinrichtung ein Heizelement zum Heizen der Ablenkanordnung aufweist und eine der Resonanzfrequenzen durch Verwendung des Heizelements zum Heizen der Ablenkanordnung einstellt.

13. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 11, wobei die Resonanzfrequenz-Steuereinrichtung eine magnetische Feder enthält, die in der Ablenkanordnung wirksam ist und die eine der Resonanzfrequenzen durch Änderung der Stromstärke einstellt, die in der magnetischen Feder vorhanden ist.

14. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 9, wobei das Steuersystem

- A) einen Phasendetektor zur Erzeugung eines Ausgangs aufweist, der für die Phasendifferenz zwischen den Komponenten der Bewegung der Ablenkanordnung bei den beiden Resonanzfrequenzen repräsentativ ist, und wobei
- B) eine Resonanzfrequenz-Steuereinrichtung auf den Phasendetektor anspricht, um derart eine der Resonanzfrequenzen zu steuern, daß eine vorherbestimmte Phasenbeziehung zwischen den beiden Resonanzfrequenz-Komponenten beibehalten wird.

15. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 14, wobei der Treibermechanismus auf mindestens eine Resonanzfrequenzkomponente der Bewegung der Ablenkanordnung anspricht, um eine Eigenschwingung des Antriebsmechanismus und der Deflektoranordnung bei dieser Frequenz zu verursachen.

16. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 15, wobei die Resonanzfrequenz-Steuereinrichtung ein Heizelement zum Heizen der Ablenkanordnung enthält und die eine Resonanzfrequenz durch Benutzung des Heizelements zum Erhitzen der Ablenkvorrichtung einstellt.

17. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 16, wobei der Antriebsmechanismus auf mindestens eine Resonanzfrequenzkomponente der Bewegung der Ablenkanordnung anspricht, um eine Eigenschwingung des Treibermechanismus und der Ablenkanordnung bei dieser Frequenz zu verursachen.

18. Konfokales Mikroskop nach Anspruch 9, wobei die Scanneranordnung eine zweite Ablenkanordnung enthält, um die Position des Zielpunkts in Richtungen im wesentlichen parallel zu einer zweiten Ablenkachse zu ändern, die im wesentlichen orthogonal zu der ersten Ablenkachse ist.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

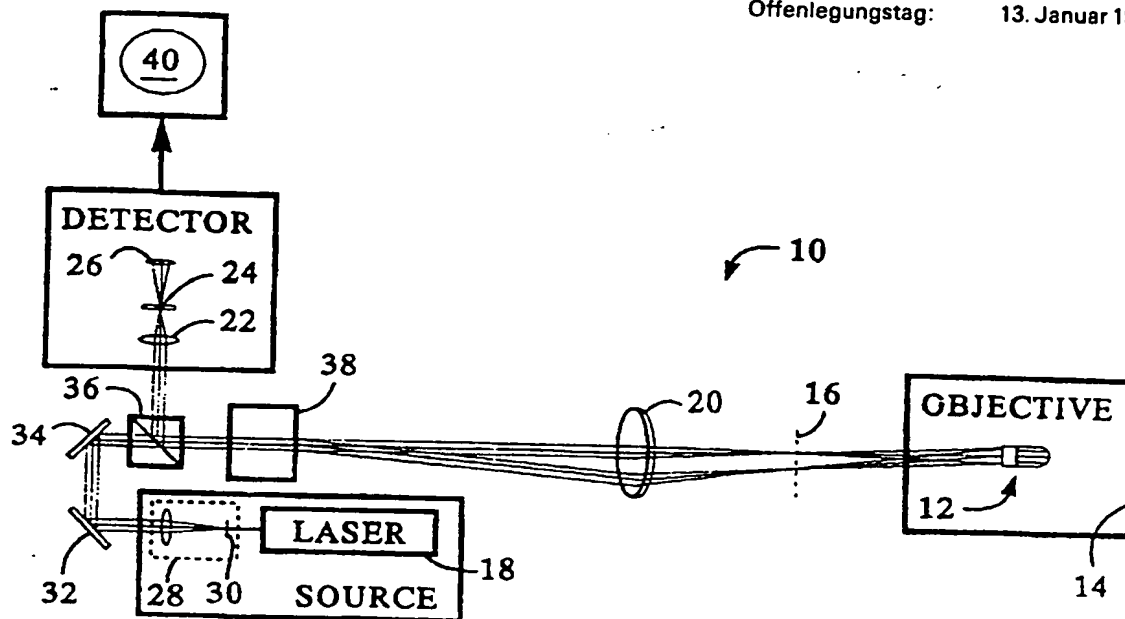


FIG. 1

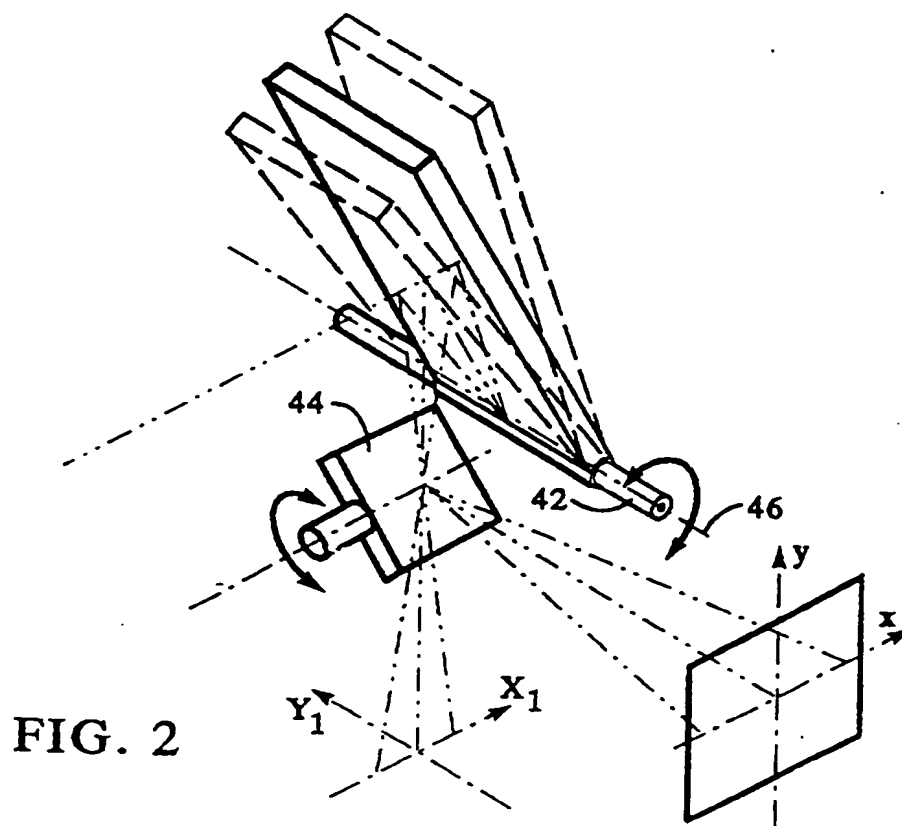


FIG. 2

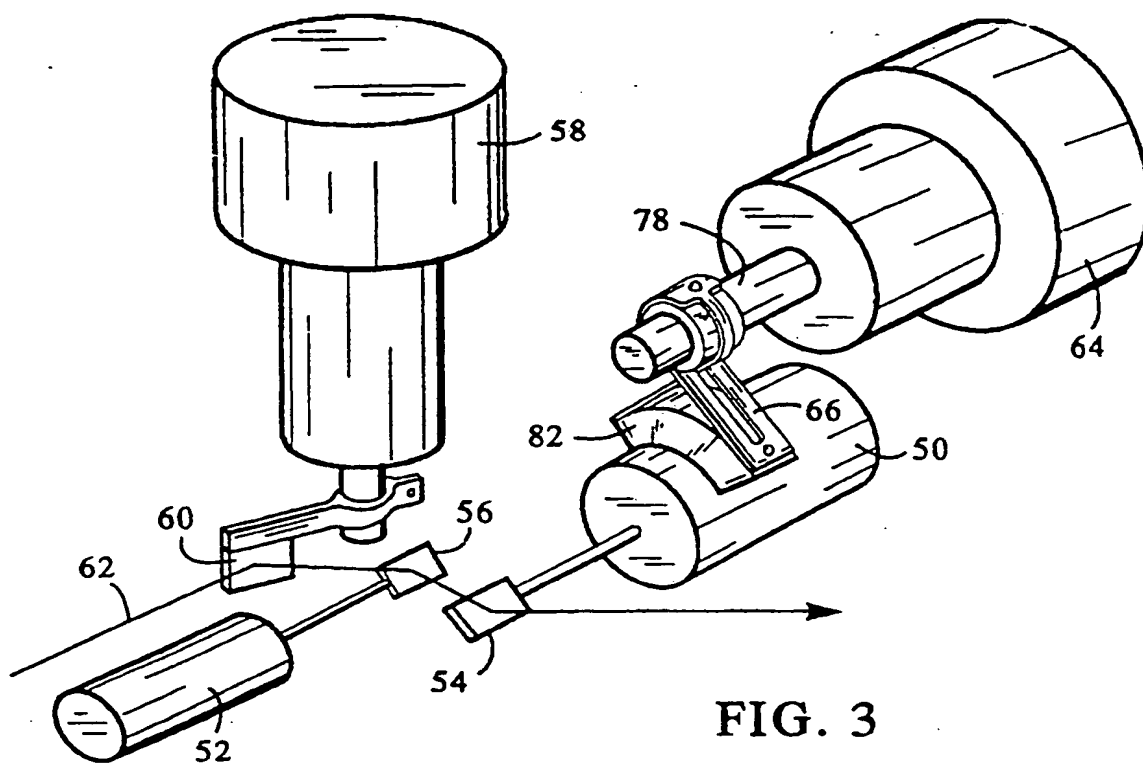


FIG. 3

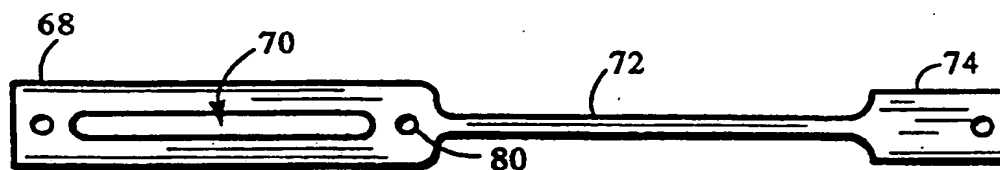


FIG. 4A

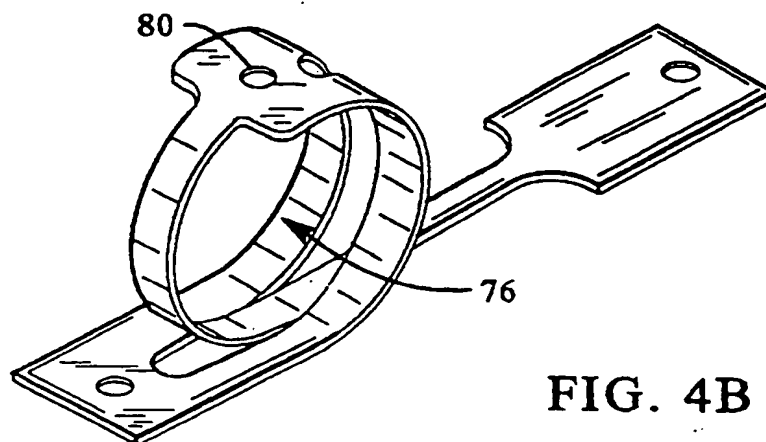
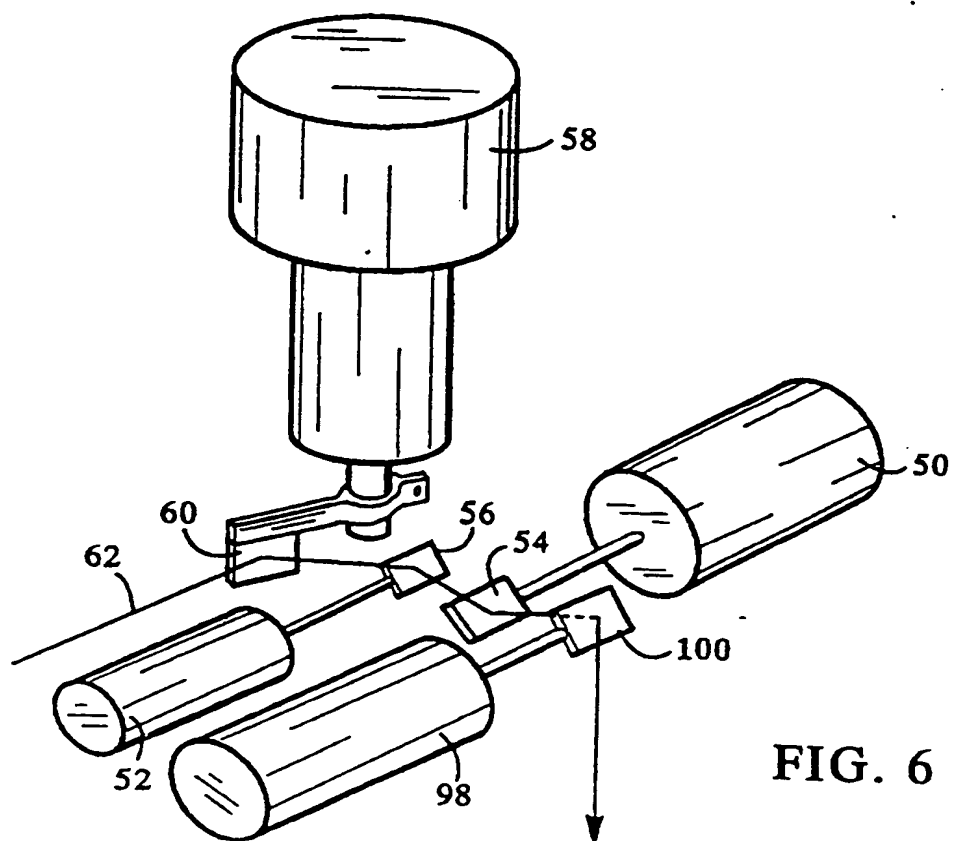
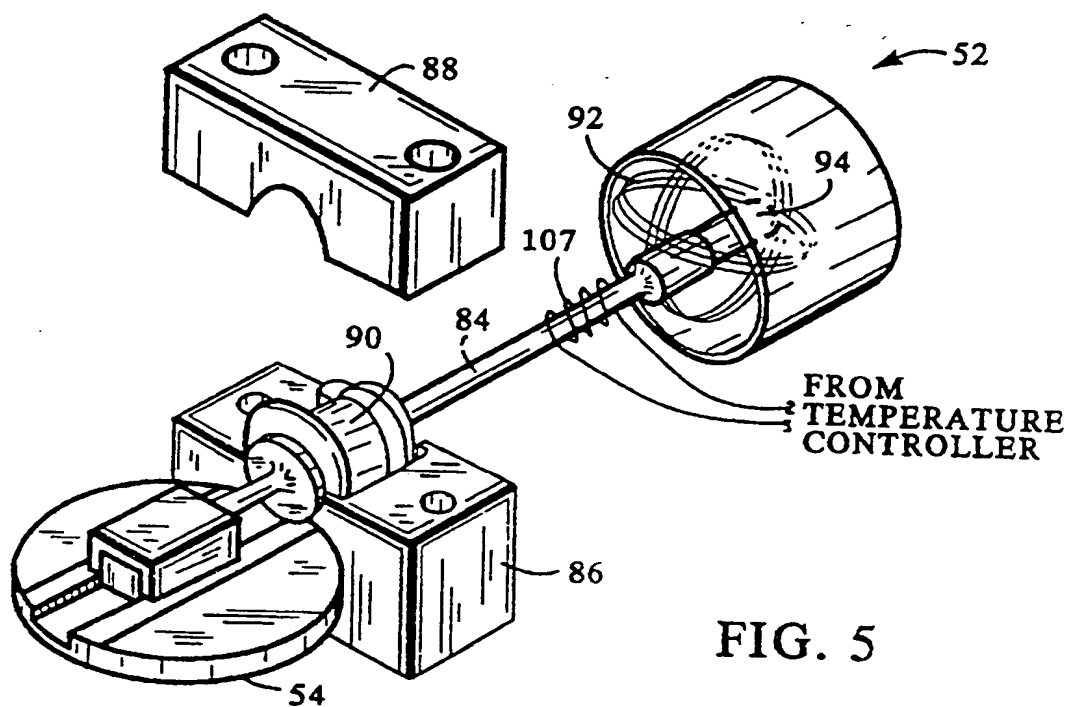


FIG. 4B



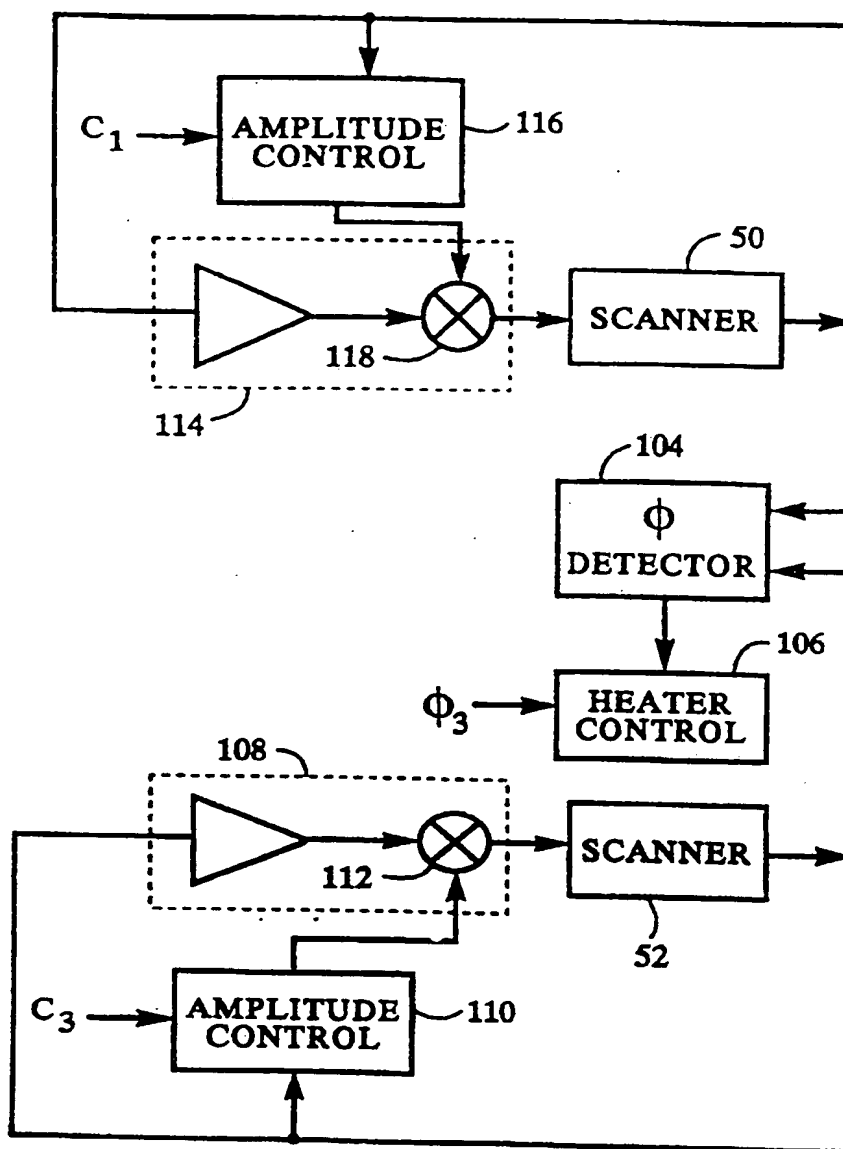


FIG. 7

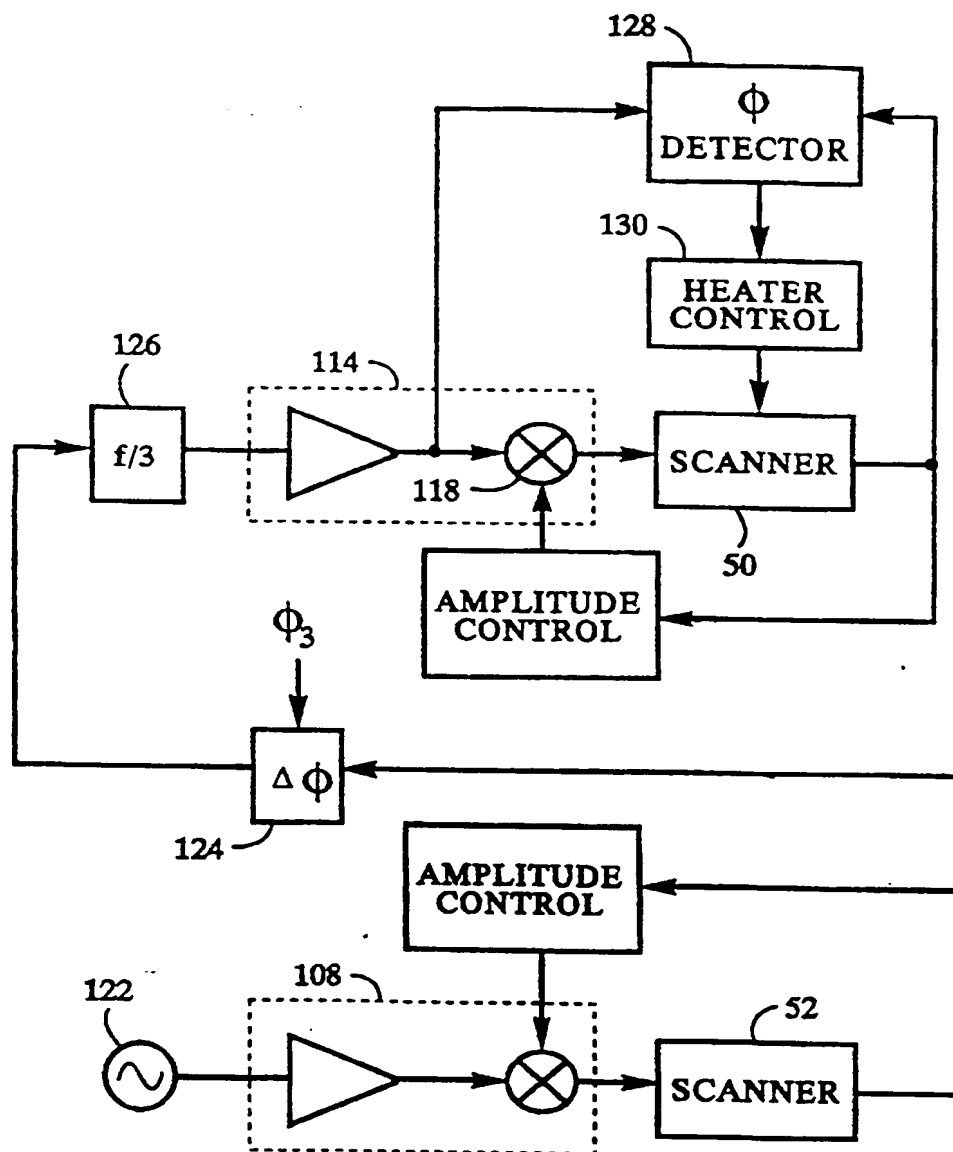


FIG. 8